1961—2022年中国西北干旱区夏季降水变化特征

郑孟林[1]，　赵　勇[1]，　杨　霞[2]

（1. 高原大气与环境四川省重点实验室/成都信息工程大学大气科学学院，四川 成都　610225；2. 新疆维吾尔自治区气象台，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要：基于1961—2022年6—8月西北干旱区102个气象站的逐日降水数据，分析了中国西北干旱区极端降水和非极端降水的时空变化特征和不同区域2种类型降水的变化差异。结果表明：(1) 中国西北干旱区夏季降水量整体呈增多趋势，伊犁河谷和塔里木盆地西部尤其显著，对年总降水量贡献的平均值超过40%。(2) 中国西北干旱区夏季极端降水量对总降水量的贡献约为45%，整体呈增加趋势，塔里木盆地西部、河西–阿拉善和新疆北部尤为显著。(3) 中国西北干旱区大部分气象站的夏季极端降水量、极端降水天数和极端降水强度均呈增加增强趋势；大部分气象站的非极端降水天数显著减少，但非极端降水强度明显增强。塔里木盆地西部夏季降水量的增加由极端降水量和非极端降水量增加共同贡献，分别贡献了总降水量增加值的61%和39%，其余区域夏季降水量的增加主要由极端降水量增加贡献。研究成果加深了对中国西北干旱区夏季2种类型降水气候变化特征的认识。

关 键 词：极端降水；非极端降水；时空特征；区域差异；中国西北干旱区

文章编号：1000－6060(2025)03－0367－13(367～379)

全球变暖背景下，由于降水和气温变化的非一致性，陆地气候类型主要存在暖干和暖湿2种演变趋势[1-5]。干旱区降水稀少，生态系统脆弱，对气候变化有着更为敏感的响应[6-7]。全球陆地干旱区大多变干，而中国西北地区气候呈明显的变湿趋势，降水增加显著[8]。中国西北地区气候在1987年发生突变，20世纪90年代初期开始变湿的面积和强度均增加[9-13]。中国西北地区未来仍将变湿，但随着排放情景升高，气候逐渐向暖干转型[14]。

水是制约干旱区农业和社会经济发展的瓶颈因素，因此干旱区降水的时空变化特征研究受到众多学者的关注[15-17]。中国西北干旱区的暖湿化具有较好的空间一致性，降水增加的趋势明显增强[18-19]。过去近60 a，中国西北地区大部分气象站的年降水量呈增加趋势[20]。20世纪80年代中国西北地区降水量呈区域性增加，90年代后全区域降水量增加明显，夏季降水呈东西反向变化的特征[21-23]。

IPCC最新报告指出全球气温将进一步增加升高，并将带来更为极端的天气气候事件[24-26]。中国西北干旱区绝大部分气象站极端降水量均呈增加趋势，加剧了西北干旱区极端气候水文事件的形成[27-28]。西北干旱区极端降水呈现山区多而平原少的特点，天山山区和新疆北部地区极端降水量呈显著增加趋势[29-32]。新疆北部汛期的总雨日数呈增加趋势，尤其是大雨日数增加最为显著[33-35]。新疆南部、天山中部、准噶尔盆地北部夏季极端降水强度呈显著增加趋势[36-37]。新疆极端降水量由山区向盆地减少，新疆北部发生极端降水概率更大[38]。

针对中国西北干旱区夏季降水事件的研究仍有如下问题需要回答：(1) 极端降水和非极端降水的时空变化特征是否一致？(2) 西北干旱区降水区域性特征明显，各区域降水变化存在哪些差异？为

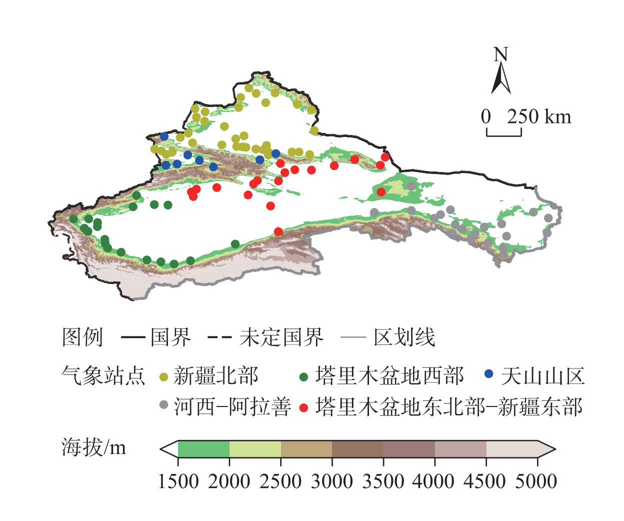
收稿日期：2024-04-02；　**修订日期**：2024-05-15
基金项目："天山英才"培养计划(2023TSYCCX0077)；成都信息工程大学科技项目(KYTD202333)资助
作者简介：郑孟林(2002-)，男，本科，主要从事干旱区气候变化研究. E-mail: menglinsd@163.com
通讯作者：赵勇(1979-)，男，博士，研究员，主要从事干旱区气候变化和模拟研究. E-mail: zhaoy608@cuit.edu.cn

回答上述问题，本文采用1961—2022年中国西北干旱区102个气象站的夏季逐日降水数据，首先分析了西北干旱区夏季降水量的时空变化特征，然后揭示了极端降水和非极端降水的时空变化差异，最后对比了每个子区域的降水变化特征，以加深对中国西北干旱区气候变化特征的认识。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国西北干旱区（73°~107°E，35°~50°N）是亚洲中部干旱区的重要组成部分，约占中国国土总面积的24.5%，包括新疆全境、甘肃河西走廊、青海祁连山区、内蒙古阿拉善高原等（图1）。西北干旱区年均降水量少于200 mm，是全球同纬度最为干旱的区域之一，属于典型的大陆性干旱气候，生态系统脆弱，近几十年气候呈现暖湿化趋势，降水增加显著[9-11]。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 中国西北干旱区地形分布与气象站点 *K*-means聚类分区

Fig. 1 Topographic distribution and *K*-means clustering partitioning of meteorological stations in the arid region of northwest China

1.2 数据来源

1961—2022年西北干旱区102个气象站的夏季逐日降水数据源自国家气象信息中心（图1）。降水数据经过了质量控制处理[39]，即在研究时间段内，如果某气象站在任意一年中有超过5%的数据缺测，则将该气象站剔除。

1.3 研究方法

采用百分位阈值法检测极端降水事件[40]：对某气象站研究时间段内所有≥0.1 mm逐日降水量按照升序排列，第90%分位的日降水量即为该气象站的极端降水阈值。某站某日降水量大于该站的极端降水阈值则发生了一次极端降水事件，反之为一次非极端降水事件。极端降水和非极端降水的降水量、天数和强度以及对总降水量贡献的定义如表1所示。

为了揭示中国西北干旱区区域降水的变化特征，采用*K*-means聚类方法针对夏季降水天数（≥0.1 mm）进行聚类分析[41]，将西北干旱区分为了新疆北部、塔里木盆地西部、天山山区、河西–阿拉善及塔里木盆地东北部–新疆东部5个子区（图1），与已有分区类似[23]。

2 结果与分析

2.1 夏季降水的基本特征

西北干旱区降水主要集中在6—8月，7月降水量达到40 mm以上（图2a）。河西–阿拉善、塔里木盆地东部和新疆东部地区，夏季降水量对年总降水

表1 降水指数的定义

Tab. 1 Definition of precipitation indices

降水指数	定义方法	单位
极端降水量	日降水量大于极端降水阈值的降水量之和	mm
极端降水天数	日降水量大于极端降水阈值的天数之和	d
极端降水强度	极端降水量与极端降水天数之比	$mm \cdot d^{-1}$
极端降水对总降水的贡献	极端降水量与总降水量之比	%
非极端降水量	日降水量小于极端降水阈值的降水量之和	mm
非极端降水天数	日降水量小于极端降水阈值的天数之和	d
非极端降水强度	非极端降水量与非极端降水天数之比	$mm \cdot d^{-1}$
非极端降水对总降水的贡献	非极端降水量与总降水量之比	%

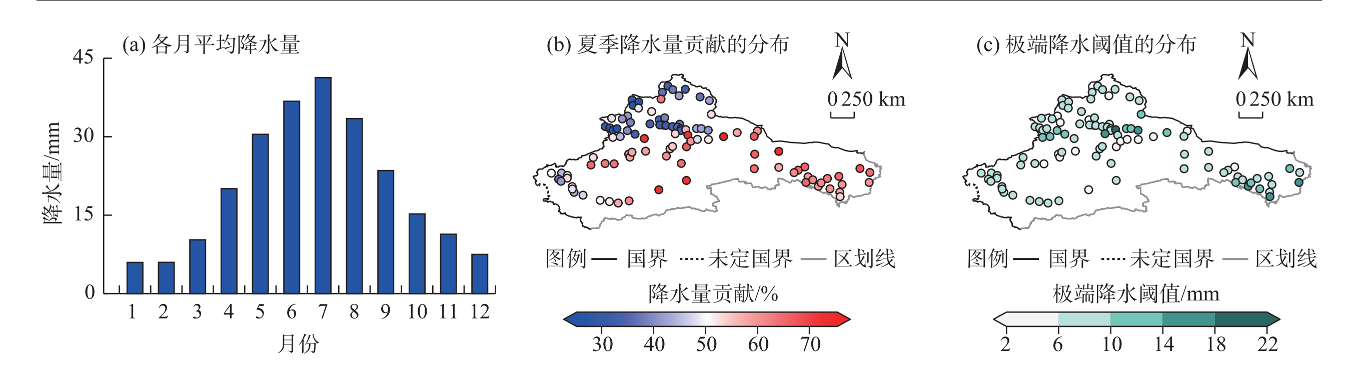


图2　中国西北干旱区平均降水量月变化以及夏季降水量平均贡献和极端降水阈值的空间分布

Fig. 2　Monthly variation of averaged precipitation and spatial distribution of mean contribution of summer precipitation to annual total precipitation, and extreme precipitation threshold in the arid region of northwest China

量的贡献最大，可占年总降水量的50%以上。天山山区和新疆北部，夏季降水量可占年总降水量的30%~40%，塔里木盆地西部夏季降水量可占年总降水量的40%~50%（图2b）。天山山区和祁连山区日降水量的90%分位阈值在10 mm以上，其余地区介于6~10 mm之间，塔里木盆地东北部和新疆东部等地区极端降水阈值小于6 mm（图2c）。

西北干旱区夏季降水量的大值区位于天山山区和祁连山区，年均夏季降水量在150 mm以上，河西-阿拉善地区及新疆北部，年均夏季降水量在50~150 mm之间，塔里木盆地西部年均夏季降水量不足100 mm，而塔里木盆地东部和新疆东部，年均夏季降水量少于25 mm（图3a）。夏季降水日数的空间分布与降水量类似（图3d）。西北干旱区83.33%（85个）的气象站夏季降水量呈增加趋势，32.35%（33个）的气象站增加显著（图3b）。降水天数的趋势变化与

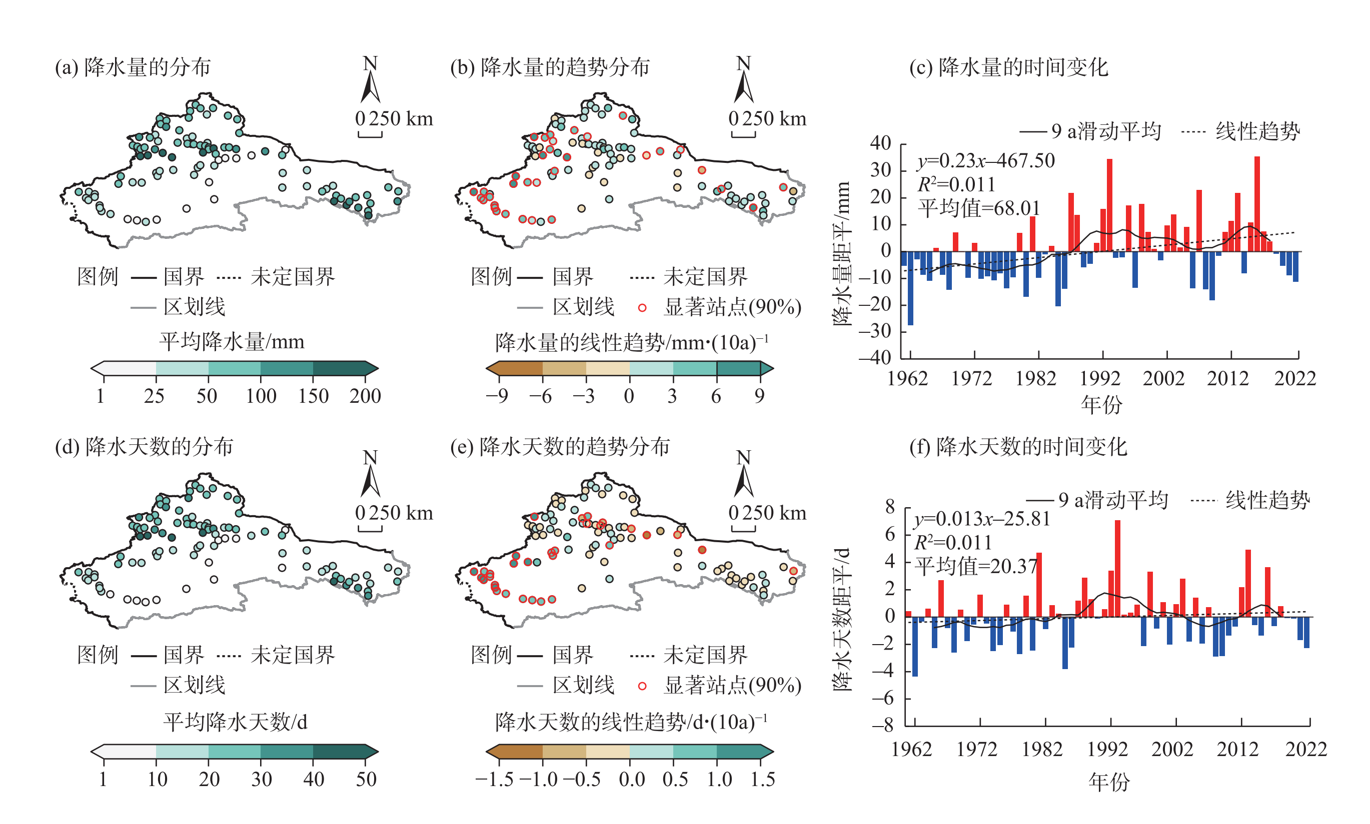


图3　中国西北干旱区夏季降水量和降水天数的平均分布、趋势变化和时间变化

Fig. 3　Distribution, trend and temporal variations of precipitation and precipitation days in summer in the arid region of northwest China

降水量有较大差异，50%（51个）的气象站降水天数增加，23.52%（24个）的气象站降水天数增加显著，主要位于塔里木盆地西部（图3e）。西北干旱区夏季降水量的平均值为68.01 mm，具有明显的年代际的变化特征（图3c）；降水天数的平均值为20.37 d，没有明显的趋势和年代际的变化特征（图3f）。

2.2 夏季极端降水的时空特征

从上文分析可知，西北干旱区夏季降水量和降水天数在趋势变化上有较大差异，为了分析其原因，将降水分为极端降水和非极端降水2类降水，做进一步分析。分析发现，西北干旱区极端降水量的多年平均分布与夏季降水量的空间分布类似（图4a）。81.37%（83个）气象站极端降水量呈增加趋势，31.37%（32个）的气象站增加显著（图4b）。西北干旱区夏季平均极端降水量为31.13 mm，区域平均极端降水量呈显著的增加趋势，增加幅度为2.0 mm·$(10a)^{-1}$，1990年后极端降水量整体偏多（图4c）。西北干旱区夏季极端降水天数的多年平均分布与极端降水量的空间分布类似（图4d）。极端降水天数的空间趋势分布特征与极端降水量基本一致（图4e）。西北干旱区夏季平均极端降水天数为2.02 d，极端降水天数具有明显的增加趋势，增加幅度为0.12 d·$(10a)^{-1}$，可以通过90%信度检验，1990年后极端降水事件多发（图4f）。极端降水强度同样在

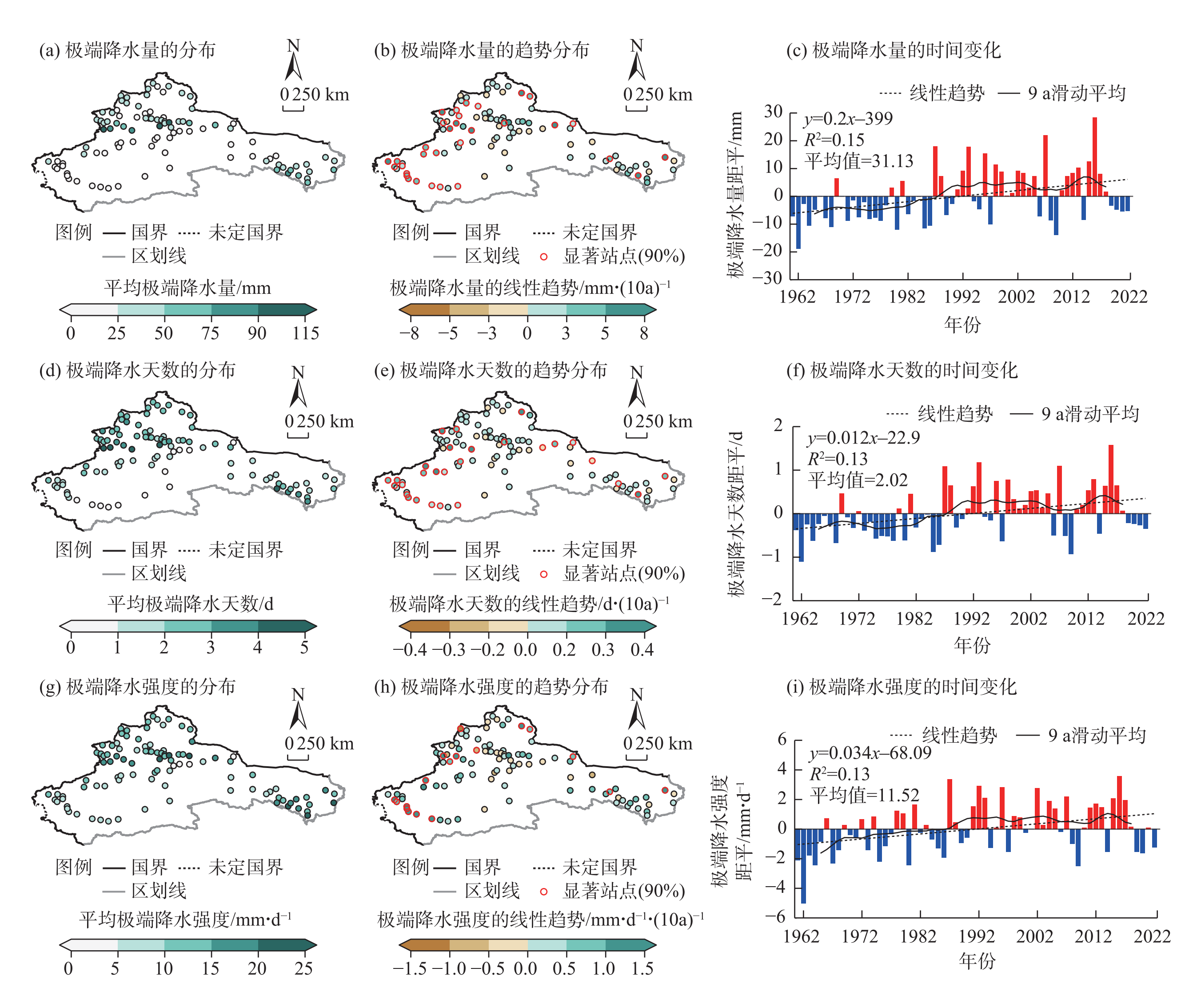


图4 中国西北干旱区夏季极端降水量和极端降水天数的平均分布、趋势变化和时间变化

Fig. 4 Distribution, trend and temporal variations of extreme precipitation and extreme precipitation days in summer in the arid region of northwest China

天山山区和祁连山区最大，达到15 mm·d^{-1}以上，其次为新疆北部，极端降水强度约为10 mm·d^{-1}左右，塔里木盆地极端降水强度在5~10 mm·d^{-1}之间，吐鲁番盆地部分气象站的极端降水强度小于5 mm·d^{-1}（图4g）。73.53%（75个）的气象站极端降水强度呈增加趋势，其中15.68%（16个）的气象站极端降水强度显著增加（图4h）。西北干旱区极端降水强度的平均值为11.52 mm·d^{-1}，区域平均的极端降水强度呈显著增加趋势，增加幅度为0.34 mm·d^{-1}·(10a)$^{-1}$，1990年后极端降水偏强（图4i）。

通过分析西北干旱区多年平均的夏季极端降水量与总降水量的比值（图5a）可知，除了天山山区和伊犁河谷的气象站外，其余地区极端降水量对总降水量贡献均超过40%，塔里木盆地部分气象站超过50%，对总降水量具有重要贡献。78.43%（80个）的气象站夏季极端降水量对总降水量的贡献呈增加趋势，塔里木盆地西部和伊犁河谷等区域增加尤其显著，22个气象站的极端降水贡献呈现减少趋势（图5b），说明极端降水量的增加是导致总降水量增加的重要因素。西北干旱区夏季极端降水量的平均贡献值为45%，区域平均极端降水贡献呈明显的增加趋势，增加幅度为1.30%·(10a)$^{-1}$，20世纪80年代末期开始，极端降水量对总降水量的贡献进一步加大（图5c）。

2.3　夏季非极端降水的时空特征

非极端降水量大值区位于天山山区和祁连山区，塔里木盆地和新疆东部非极端降水量少于30 mm（图6a）。62.75%（64个）的气象站非极端降水量呈增加趋势，其中21.57%（22个）的气象站增加尤其显著，主要集中在塔里木盆地西部，而天山山区和祁连山区的非极端降水量呈减少趋势（图6b）。非极端降水量在20世纪90年代明显偏多（图6c）。天山山区和祁连山区的非极端降水日数在30 d以上，塔里木盆地南部和新疆东部非极端降水日数不足10 d（图6d）。仅有41.17%（42个）的气象站非极端降水日数增加，大部分气象站的非极端降水日数减少（图6e），这导致夏季降水日数明显减少。西北干旱区非极端降水日数的平均值为18.35 d，没有明显的趋势变化，在20世纪90年代，非极端降水日数距平多处于正异常（图6f）。非极端降水的平均降水强度大多小于5 mm·d^{-1}，天山山区和祁连山区的非极端降水强度多为3~5 mm·d^{-1}，新疆北部和河西–阿拉善地区的非极端降水强度约为2~3 mm·d^{-1}，塔里木盆地和新疆东部非极端降水强度不足2 mm·d^{-1}（图6g）。与降水日数不同，78.43%（80个）的气象站非极端降水强度呈增强趋势，其中23.53%（24个）的气象站尤为显著（图6h）。西北干旱区的非极端降水强度的平均值为1.78 mm·d^{-1}，区域平均的非极端降水强度距平呈现显著的线性增加趋势，可以通过90%的信度检验，20世纪80年代末期，非极端降水开始增强（图6i）。

2.4　各子区域极端降水和非极端降水变化的对比分析

采用*K*-means聚类方法，基于降水日数将西北干旱区分为5个子区域，依次为新疆北部、塔里木盆地西部、天山山区、河西–阿拉善和塔里木盆地东北

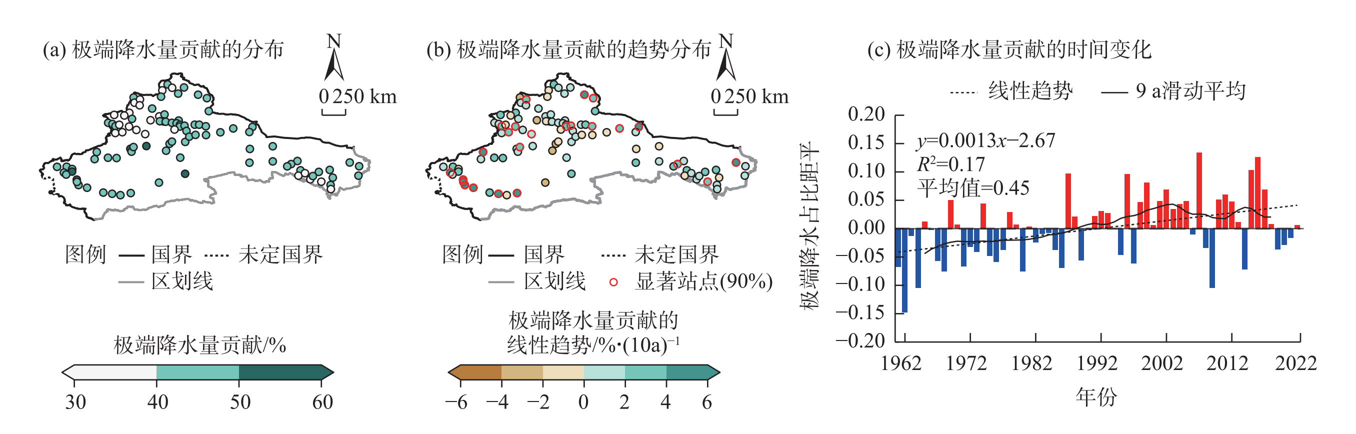


图5　中国西北干旱区夏季极端降水量对总降水量贡献的平均分布、趋势变化和时间变化

Fig. 5　Distribution, trend and temporal variations in the contribution of extreme precipitation in summer to total precipitation in the arid region of northwest China

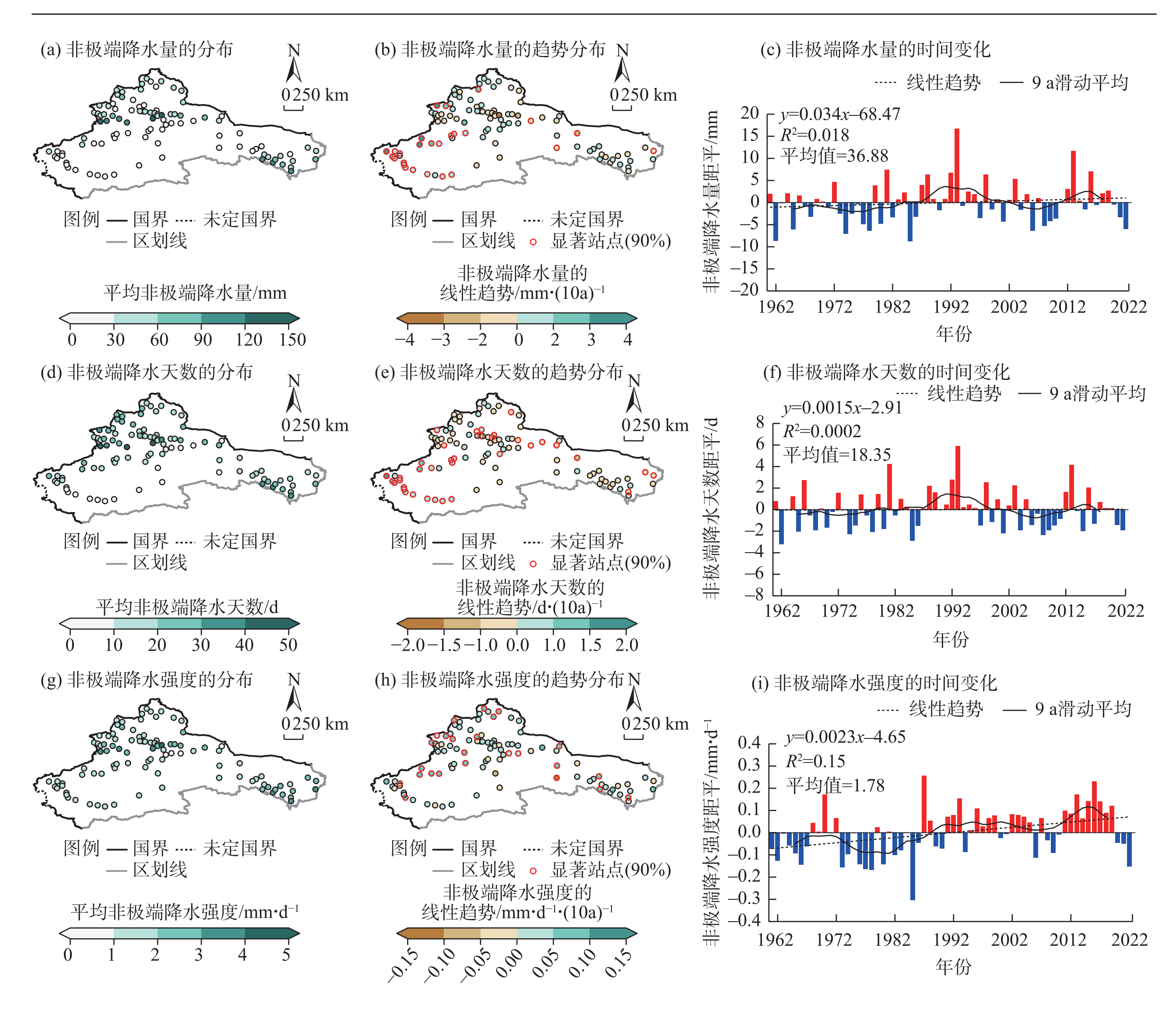


图6 中国西北干旱区夏季非极端降水量和非极端降水天数的平均分布、趋势变化和时间变化

Fig. 6 Distribution, trend and temporal variations of non-extreme precipitation and non-extreme precipitation days in summer in the arid region of northwest China

部–新疆东部，对比分析了夏季各个子区域的总降水量、极端降水量和非极端降水量的时间变化特征。

新疆北部夏季平均总降水量为66.22 mm，呈现增加趋势，增加幅度为1.80 mm·(10a)$^{-1}$，20世纪80年代中后期开始，降水量开始偏多(图7a)；夏季平均极端降水量为30.49 mm，呈增加趋势，增加幅度为1.70 mm·(10a)$^{-1}$，20世纪80年代中后期开始极端降水偏多，与总降水量同步(图7f)；夏季非极端降水量呈微弱的增加趋势，20世纪90年代该区域非极端降水量偏多(图7k)。天山山区的夏季平均总降水量为193.74 mm，呈增加趋势，增加幅度为4.80 mm·(10a)$^{-1}$，年代际的变化与新疆北部类似(图7b)；夏季平均极端降水量为82.24 mm，也呈明显的增加趋势，20世纪90年代开始天山山区的极端降水开始增多(图7g)；夏季平均非极端降水量为111.50 mm，呈微弱的减少趋势，减少幅度为0.36 mm·(10a)$^{-1}$(图7l)。塔里木盆地西部夏季平均降水量呈显著的增加趋势，可通过90%信度检验，增加幅度为4.40 mm·(10a)$^{-1}$，20世纪80年代末期开始夏季降水开始增多(图7c)；夏季极端降水量和非极端降水量均呈显著的增加，均可以通过90%信度检验，前者的增加幅度为2.70 mm·(10a)$^{-1}$，后者为1.70 mm·(10a)$^{-1}$，说明夏季塔里木盆地西部降水量的由2种类型的降水共同增加贡献(图7h、m)。塔里

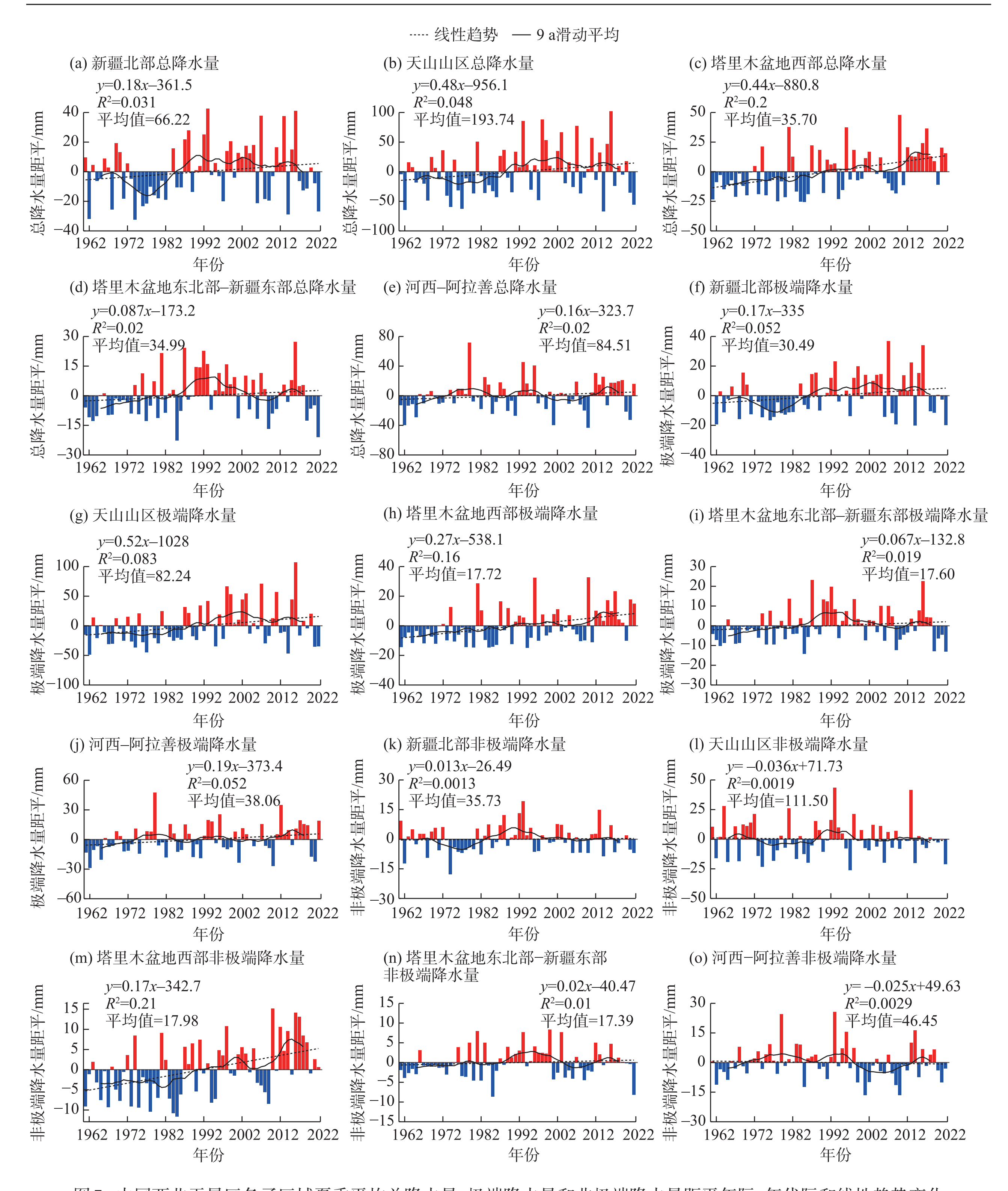


图7　中国西北干旱区各子区域夏季平均总降水量、极端降水量和非极端降水量距平年际、年代际和线性趋势变化

Fig. 7　Interannual, interdecadal and trend variations of average total precipitation, extreme precipitation and non-extreme precipitation anomaly in summer from each sub-region in the arid region of northwest China

木盆地东北部–新疆东部地区是整个西北干旱区夏季降水最少的区域，夏季平均降水量仅有34.99 mm，20世纪的90年代是该区域降水最多的时期(图7d)；夏季极端降水量和非极端降水量分别为17.60 mm和17.39 mm，均呈微弱的增加趋势，均在20世纪90年代最多(图7i、n)。河西–阿拉善地区夏季平均降水量为84.51 mm，夏季降水量呈增加趋势，增加幅度为1.60 mm·$(10a)^{-1}$，20世纪70年代中期至90年代中期

和2010年后，该区域夏季降水量整体偏多（图7e）；夏季平均极端降水量为38.06 mm，也呈增加趋势，增加幅度为1.90 mm·(10a)$^{-1}$（图7j）；夏季平均非极端降水量为46.45 mm，呈微弱的减少趋势，20世纪70年代中期至90年代中期，该区域非极端降水量整体偏多（图7o）。

新疆北部夏季平均极端降水天数为2.21 d，极端降水天数呈增加趋势，20世纪80年代中后期开始极端降水多发（图8a）；夏季平均非极端降水日数为20.04 d，非极端降水日数呈微弱的减少趋势，2000年以后，非极端降水发生天数减少（图8f）。天山山区夏季平均极端降水天数为4.02 d，极端降水日数呈增加趋势，20世纪80年代中后期开始极端降水多发（图8b）；夏季平均非极端降水日数为36.57 d，非极端降水日数呈微弱的减少趋势，20世纪90年代，非极端降水日数偏多，2000年后，非极端降水日偏少（图8g）。塔里木盆地西部的夏季平均极端降水和非极端降水日数分别为1.33 d和12.07 d，均呈显

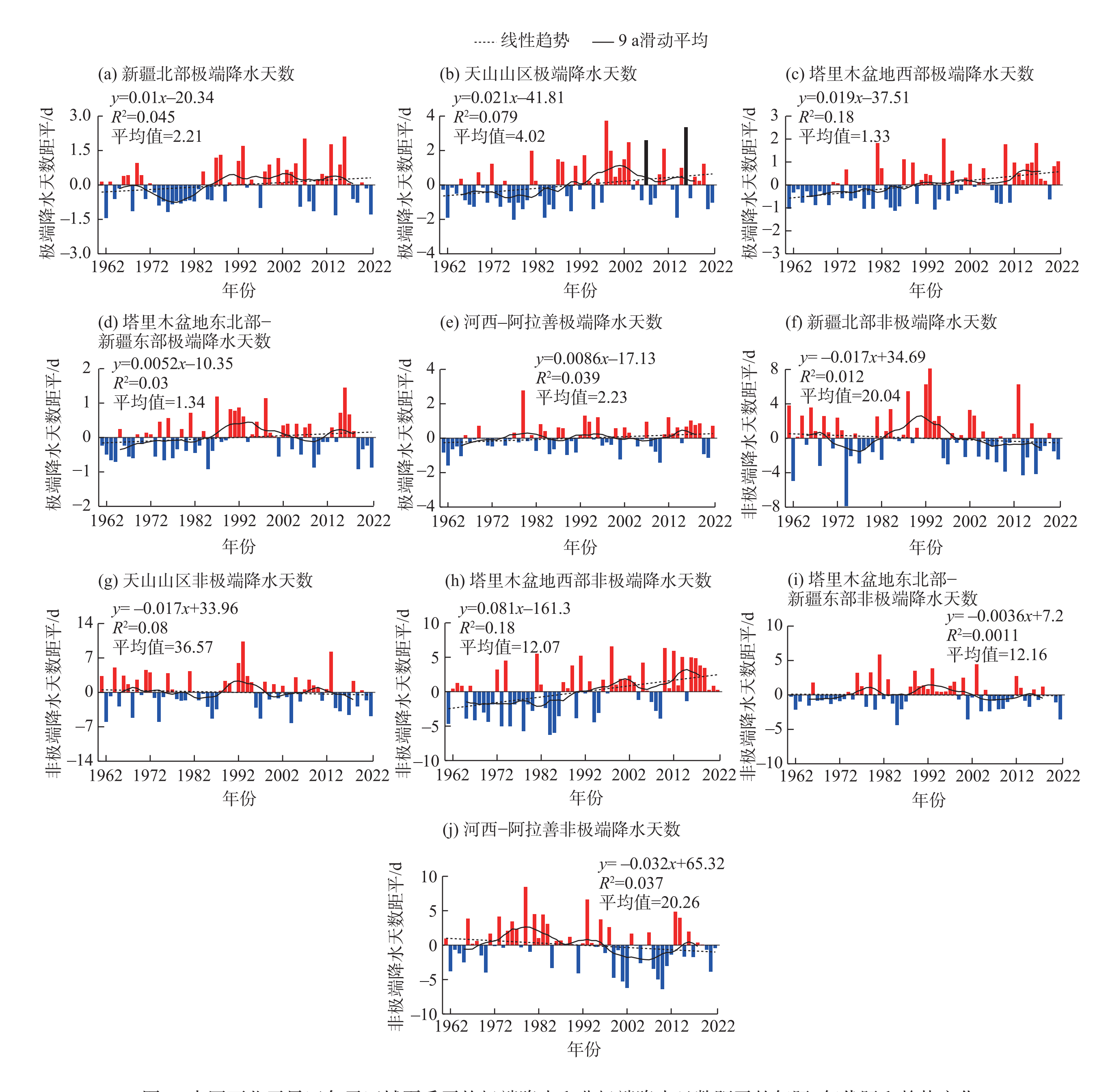


图8 中国西北干旱区各子区域夏季平均极端降水和非极端降水日数距平的年际、年代际和趋势变化

Fig. 8 Interannual, interdecadal and trend variations of average extreme precipitation and non-extreme precipitation day anomaly in summer from each sub-region in the arid region of northwest China

著增加趋势，可以通过90%信度检验，20世纪80年代末期开始极端降水和非极端降水均多发（图8c、h）。塔里木盆地东北部–新疆东部平均极端降水和非极端降水日数分别为1.34 d和12.16 d，前者呈微弱的增加趋势，后者呈微弱的减少趋势，20世纪90年代2种类型的降水均多发（图8d、i）。河西–阿拉善夏季平均极端降水日数为2.23 d，呈增加趋势，20世纪70年代中期至90年代中期和2010年后，极端降水多发（图8e）。河西–阿拉善夏季平均非极端降水日数为20.26 d，呈减少趋势，20世纪90年代中后期开始非极端降水发生天数减少（图8j）。

新疆北部夏季平均极端降水强度为13.62 mm·d^{-1}，极端降水强度呈微弱的增加趋势（图9a），说明夏季新疆北部极端降水的增加主要由极端降水日数的增加贡献；夏季平均非极端降水强度为1.77 mm·d^{-1}，非极端降水强度呈显著的增强趋势，可以通过90%的

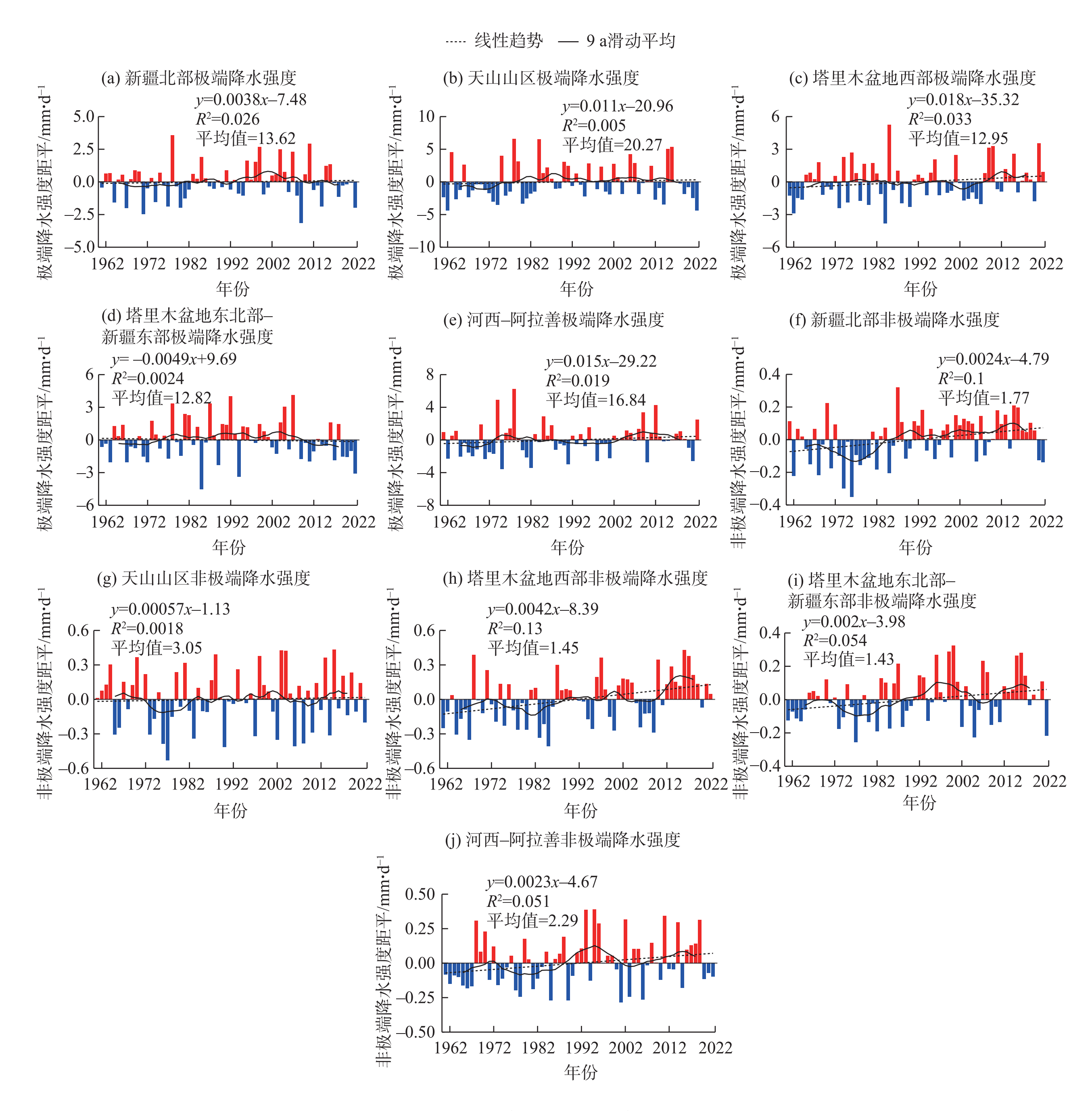


图9 中国西北干旱区各个子区域夏季平均极端降水和非极端降水强度距平的年际、年代际和线性趋势变化

Fig. 9 Interannual, interdecadal and trend variations of average extreme precipitation and non-extreme precipitation intensity anomaly in summer from each sub-region in the arid region of northwest China

信度检验，20世纪80年代中后期开始非极端降水强度增大（图9f）。天山山区夏季平均极端降水强度为20.27 mm·d^{-1}，极端降水强度呈微弱的增加趋势（图9b）；夏季平均非极端降水强度为3.05 mm·d^{-1}，也呈微弱的增加趋势（图9g）。塔里木盆地西部夏季平均极端降水强度为12.95 mm·d^{-1}，极端降水强度呈增加趋势，2010年后极端降水强度明显增大（图9c）；夏季平均非极端降水强度为1.45 mm·d^{-1}，非极端降水强度呈明显的增强趋势，可以通过90%信度检验，同样在2010年后非极端降水强度明显增大（图9h）。塔里木盆地东北部-新疆东部夏季平均极端降水强度（12.82 mm·d^{-1}）是西北干旱区最小的区域，极端降水强度呈微弱的减少趋势，20世纪80年代至90年代中期，极端降水强度相对较大（图9d）；夏季平均非极端降水强度为1.43 mm·d^{-1}，非极端降水强度呈增加趋势，20世纪90年代开始非极端降水强度偏强（图9i）。河西-阿拉善地区夏季平均极端降水强度为16.84 mm·d^{-1}，夏季平均非极端降水强度为2.29 mm·d^{-1}，均呈增加趋势（图9e、j）。

3 结 论

（1）中国西北干旱区夏季的平均降水量为68.01 mm，平均降水天数为20.37 d，对年总降水量贡献的平均值超过40%，塔里木盆地东北部-新疆东部和河西-阿拉善地区，夏季降水量贡献高达50%以上。中国西北干旱区83.33%的气象站夏季降水量呈增加趋势，并在塔里木盆地西部和伊犁河谷显著增加。50%的气象站降水天数呈增加趋势，并在塔里木盆地西部显著增加，可以通过90%信度检验，而新疆东部和北部部分气象站显著减少。

（2）中国西北干旱区夏季平均极端降水量为31.13 mm，81.37%的气象站极端降水量呈增加趋势，塔里木盆地西部和伊犁河谷及河西-阿拉善地区显著增加，20世纪80年代后期开始，极端降水量整体偏多，加大了水文和地质灾害发生风险。夏季极端降水量对总降水量的平均贡献为45%，其中78.43%的气象站极端降水量对总降水量的贡献呈增加趋势，塔里木盆地西部尤其显著。大部分气象站的非极端降水量也呈增加趋势，但非极端降水天数呈减少趋势，非极端降水量增加由非极端降水强度增强贡献。

（3）5个子区域夏季降水量和极端降水量均呈增加趋势，天山山区和河西-阿拉善的非极端降水量微弱减少，其余地区均增加，其中塔里木盆地西部极端降水量和非极端降水量均呈显著增加趋势，分别贡献了夏季的总降水量增加值的61%和39%。5个子区域极端降水量的增加由降水天数和降水强度增加共同贡献，非极端降水量除了塔里木盆地西部由降水天数和强度同时贡献外，其余区域由降水强度增强贡献。

参考文献（References）

[1] 施晓晖, 徐祥德. 1951—2002年全球陆地气温和降水的年代际趋势转折特征[J]. 自然科学进展, 2008, 18(9): 1016-1026. [Shi Xiaohui, Xu Xiangde. Characteristics of the turnaround in interdecadal trends in global land temperature and precipitation from 1951 to 2002[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(9): 1016-1026.]

[2] 施能, 陈绿文, 封国林, 等. 1920—2000年全球陆地降水气候特征与变化[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 435-443. [Shi Neng, Chen Luwen, Feng Guolin, et al. Climate characters and changes in global land precipitation field from 1920 to 2000[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(4): 435-443.]

[3] 徐保梁, 杨庆, 马柱国. 全球不同空间尺度陆地年降水的年代尺度变化特征[J]. 大气科学, 2017, 41(3): 593-602. [Xu Baoliang, Yang Qing, Ma Zhuguo. Decadal characteristics of global land annual precipitation variation on multiple spatial scales[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(3): 593-602.]

[4] Hu Z Y, Chen X, Chen D L, et al. "Dry gets drier, wet gets wetter": A case study over the arid regions of Central Asia[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(2): 1072-1091.

[5] 卢冬燕, 朱秀芳, 唐明秀, 等. 不同温升情景下中国旱灾风险变化评估[J]. 干旱区地理, 2024, 47(3): 369-379. [Lu Dongyan, Zhu Xiufang, Tang Mingxiu, et al. Assessment of drought risk changes in China under different temperature rise scenarios[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(3): 369-379.]

[6] Huang J P, Ma J R, Guan X D, et al. Progress in semi-arid climate change studies in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36: 922-937.

[7] 陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 111-119. [Chen Yaning, Li Yupeng, Li Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 111-119.]

[8] 杨金虎, 江志红, 刘晓芸, 等. 近半个世纪中国西北干湿演变及

持续性特征分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 10-22. [Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Liu Xiaoyun, et al. Influence research on spring vegetation of Eurasia to summer drought-wetness over the northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 10-22.]

[9] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China[J]. Journal of Glaciolgy and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226.]

[10] 任子健, 王江林, 徐贺年, 等. 祁连山地区过去500 a年代际旱涝事件演化及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(2): 214-227. [Ren Zijian, Wang Jianglin, Xu Henian, et al. Evolution and driving factors of mega drought and pluvial events in the Qilian Mountains during the past 500 years[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(2): 214-227.]

[11] 姚旭阳, 张明军, 张宇, 等. 中国西北地区气候转型的新认识[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 671-683. [Yao Xuyang, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. New insights into climate transition in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 671-683.]

[12] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(增刊2): 3757-3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(Suppl. 2): 3757-3771.]

[13] Zhang Q, Yang J H, Duan X Y, et al. The eastward expansion of the climate humidification trend in northwest China and the synergistic influences on the circulation mechanism[J]. Climate Dynamics, 2022, 59: 2481-2497.

[14] 陈发虎, 谢亭亭, 杨钰杰, 等. 我国西北干旱区"暖湿化"问题及其未来趋势讨论[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(6): 1246-1262. [Chen Fahu, Xie Tingting, Yang Yujie, et al. Discussion of the "warming and wetting" trend and its future variation in the drylands of northwest China under global warming[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(6): 1246-1262.]

[15] Yao J Q, Chen Y N, Guan X F, et al. Recent climate and hydrological changes in a mountain-basin system in Xinjiang, China[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 226: 103957, doi: 10.1016/j.earscirev.2022.103957.

[16] 任朝霞, 杨达源. 近50 a西北干旱区气候变化对农业的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 48-53. [Ren Zhaoxia, Yang Dayuan. Impacts of climate change on agriculture in the arid region of northwest China in resent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(8): 48-53.]

[17] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 483-493. [Wang Yujie, Qin Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of northwest China: An overview[J]. Climate Change Research, 2017, 13(5): 483-493.]

[18] Zhang Q, Yang J H, Wang W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 113-127.

[19] 王澄海, 张晟宁, 张飞民, 等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980-989. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Zhang Feimin, et al. On the increase of precipitation in the northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 980-989.]

[20] 王澄海, 张晟宁, 李课臣, 等. 1961—2018年西北地区降水的变化特征[J]. 大气科学, 2021, 45(4): 713-724. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Li Kechen, et al. Change characteristics of precipitation in northwest China from1961 to 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(4): 713-724.]

[21] Chen Y N, Li Z, Fan Y T, et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of northwest China [J]. Environmental Research, 2015, 139: 11-19.

[22] Wang H J, Chen Y N, Chen Z S. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960—2010[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(12): 1807-1818.

[23] 姚俊强, 杨青, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区降水时空分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5846-5855. [Yao Junqiang, Yang Qing, Liu Zhihui, et al. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5846-5855.]

[24] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年中国西北地区夏季降水场变化特征及影响因素分析[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1247-1258. [Chen Dongdong, Dai Yongjiu. Characteristics and analysis of typical anomalous summer rainfall patterns in northwest China over the last 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(6): 1247-1258.]

[25] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 我国西北地区近50年降水和温度的变化[J]. 气候与环境研究, 2003(1): 9-18. [Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. The climatic change in northwest China in recent 50 years[J]. Climatic and Environmental Research, 2003(1): 9-18.]

[26] 翟盘茂, 周佰铨, 陈阳, 等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 629-635. [Zhai Panmao, Zhou Baiquan, Chen Yang, et al. Several new understandings in the climate change science[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 629-635.]

[27] Deng H J, Chen Y N, Shi X, et al. Dynamics of temperature and precipitation extremes and their spatial variation in the arid region of northwest China[J]. Atmospheric Research, 2014, 138: 346-355.

[28] Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China: Observation and projection[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34: 289-305.

[29] Hu W F, Yao J Q, He Q, et al. Changes in precipitation amounts and extremes across Xinjiang (northwest China) and their connection to climate indices[J]. PeerJ, 2021, 9: e10792, doi: 10.7717/peerj.10792.

[30] 赵丽, 韩雪云, 杨青. 近50 a西北干旱区极端降水的时空变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 19-26. [Zhao Li, Han Xueyun, Yang Qing. Spatial and temporal variability of the extreme precipitation in the arid region of northwest China during recent 50 years[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(1): 19-26.]

[31] 刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759. [Liu Youcun, Jiao Keqin, Zhao Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 748-759.]

[32] 周雅蔓, 刘晶, 赵勇, 等. 春季热带海温与北疆夏季极端降水的关系研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1166-1178. [Zhou Yaman, Liu Jing, Zhao Yong, et al. Study on the relationship between tropical sea surface temperature in spring and extreme summer precipitation in northern Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1166-1178.]

[33] 赵勇, 黄丹青, 杨青. 新疆北部汛期降水的变化特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 35-40. [Zhao Yong, Huang Danqing, Yang Qing. Analysis on variation of precipitation in flood season in north Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 35-40.]

[34] 赵勇, 黄丹青, 古丽格娜, 等. 新疆北部夏季强降水分析[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 773-779. [Zhao Yong, Huang Danqing, Guligena, et al. Analysis on summer heavy rainfall in the northern Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(5): 773-779.]

[35] 周雅蔓, 赵勇, 刘晶. 我国新疆北部地区夏季极端降水事件的特征分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 598-608. [Zhou Yaman, Zhao Yong, Liu Jing. Analyzing on the characteristics of extreme summer precipitation events in northern Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 598-608.]

[36] Wang S P, Jiang F Q, Ding Y J. Spatial coherence of variations in seasonal extreme precipitation events over northwest arid region, China[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(15): 4642-4654.

[37] 王少平, 姜逢清, 吴小波, 等. 1961—2010年西北干旱区极端降水指数的时空变化分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 318-326. [Wang Shaoping, Jiang Fengqing, Wu Xiaobo, et al. Temporal and spatial variability of the extreme precipitation indices over the arid regions in northwest China from 1961 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 318-326.]

[38] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 基于Copula函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12. [Zhang Qiang, Li Jianfeng, Chen Xiaohong, et al. Spatial variability of probability distribution of extreme precipitation in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 3-12.]

[39] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.

[40] 张林梅, 苗运玲, 李健丽, 等. 新疆阿勒泰地区近50 a夏季极端降水事件变化特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1199-1208. [Zhang Linmei, Miao Yunling, Li Jianli, et al. Variations of summer extreme precipitation events in Altay Prefecture, Xinjiang region, from 1961 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1199-1208.]

[41] 冯克鹏, 田军仓, 沈晖. 基于*K*-means聚类分区的西北地区近半个世纪气温变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1239-1252. [Feng Kepeng, Tian Juncang, Shen Hui. Temperature variation characteristics of northwest China based on *K*-means clustering partition in the past half century[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1239-1252.]

Variation characteristics of summer precipitation in the arid region of northwest China from 1961 to 2022

ZHENG Menglin[1], ZHAO Yong[1], YANG Xia[2]

(1. Plateau Atmosphere & Environment Key Laboratory of Sichuan Province/School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Using summer daily precipitation data from 102 meteorological stations from June to August during 1961—2022, the spatial and temporal characteristics of extreme and non-extreme precipitation were analyzed, and variations in these two precipitation types across different areas of the arid region of northwest China were compared. The results reveal the following: (1) Summer precipitation in the arid region of northwest China exhibited an increasing trend, particularly in the Ili River Valley and the western Tarim Basin, contributing an average of more than 40% to total annual precipitation. (2) Extreme precipitation in summer accounted for approximately 45% of total precipitation in the arid region, with an overall increasing trend, notably in the western Tarim Basin, Hexi-Alagxa, and northern Xinjiang. (3) Most meteorological stations in the region recorded increasing trends in extreme precipitation, extreme precipitation days, and extreme precipitation intensity. However, the number of non-extreme precipitation days showed significant decreases at most stations, while non-extreme precipitation intensity increased significantly. In the western Tarim Basin, the increase in summer precipitation was driven by both extreme and non-extreme precipitation, contributing 61% and 39% of the total increase, respectively. In other regions, the rise in summer precipitation was predominantly due to the increase in extreme precipitation. These findings enhance understanding of summer precipitation climate change in the arid region of northwest China.

Key words: extreme precipitation; non-extreme precipitation; spatial and temporal characteristics; regional difference; arid region of northwest China